

## Отзыв

официального оппонента о работе Куценко Александра Сергеевича “Локальные магнитные поля на Солнце”, представленной на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.1 – Физика космоса, астрономия.

Магнитографические наблюдения Солнца обнаруживают сложную иерархию пространственного распределения магнитных полей на поверхности фотосферы. Эта иерархия включает все доступные масштабы для наблюдений, от магнитных особенностей в межгранульных промежутках до глобальных масштабов охватывающих все Солнце. Эта сложная картина распределения меняется в солнечном цикле и на более длинных интервалах времени. Современные теоретические представления указывают на то, что одним из ключевых элементов этой сложной картины является некоторый глобальный процесс гидромагнитного солнечного динамо, генерирующего крупномасштабное магнитное поле Солнца. Детали этого процесса по-прежнему остаются неясны. Основная трудность с которой сталкиваешься при попытке понять природу магнитной активности Солнца состоит в невозможности математически корректного разделения вкладов локальных и глобальных магнитных полей на доступном ряде данных солнечных наблюдений. При подходящем усреднении данных магнитных измерений можно, конечно, выделить крупномасштабные компоненты магнитного поля. В то же время наблюдения показывают, что на поверхности магнитная энергия сосредоточена в малых пространственных масштабах, включающих в себя поля сетки, эфемерные области, магнитные поля пятен. Появление и эволюция групп пятен является причиной наиболее значимых явлений событий солнечной активности, влияющих на физические параметры гелиосферы и космическую погоду в окрестности Земли. Кроме того, для того, чтобы понять взаимосвязь активных областей с крупномасштабным солнечным динамо необходимы детальные исследования свойств магнитных полей в масштабах активной области. Например, закономерности эволюции активных областей, степень участия в глобальном вращении конвективной зоны, типичная топология магнитного поля и прочее. Все эти вопросы являются основными для данной диссертации. **Все это делает работу актуальной.**

Докторская диссертация А.С. Куценко посвящена исследованию свойств локальных концентраций магнитных полей в пятнах и эфемерных областях с целью изучения их закономерностей для уточнения механизмов их формирования в конвективной зоне Солнца.

Структура диссертации: работа состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы.

Введение содержит необходимое описание предмета и цели исследований, актуальности, научной новизны и практической значимости с оценкой степени достоверности научных результатов. Приведены положения, выносимые на защиту, остальные необходимые элементы также присутствуют. При описании текущих представлений о природе солнечной активности и роли активных областей в крупномасштабном динамо конвективной зоны автор делает упор на феноменологическую картину сценария Бэбкока-Лейтона. Должен отметить, что данный сценарий, несмотря на многочисленные недостатки, удобен для целей этой работы, поскольку даёт наиболее детальную феноменологию того, как могут формироваться активные области из полей, генерируемых в крупномасштабном динамо конвективной зоны. В тоже самое время, основные элементы этого сценария — трубки или жгуты магнитного поля так и не нашли подтверждения в прямом численном моделировании солнечной конвективной зоны. Согласно численным моделям солнечной конвекции, внутри конвективной зоны магнитное поле состоит из слабо когерентных турбулентных магнитных слоёв, например, Warnecke и др 2021; Käpylä и др 2023 Space Science Reviews и ссылки там. Невысокая когерентность магнитных структур на поверхности Солнца также отмечается в известном обзоре Стенфло 2013 года. Все эти факты подчёркивают сложность понимания общей картины солнечного динамо.

Первая глава содержит обширное введение в общие методы и подходы, применяемые для измерения магнитных полей Солнца. Основным инструментом, данные которого использовались в работе, был Helioseismic and Magnetic Imager [HMI] космической обсерватории Solar Dynamics Observatory [SDO]. Кроме того, в рамках решения основных задач диссертации был разработан и создан новый инструмент для спектрополяриметрии активных областей и участков спокойной атмосферы Солнца с высоким спектральным разрешением. Получаемые на данном телескопе результаты показывают хорошее согласие с данными SDO/HMI и дают независимый источник информации о магнитном поле и термодинамических параметрах атмосферы Солнца. В конце главы делается вывод о том, что новый инструмент значительно расширяет возможности отечественного и мирового сообщества по исследованиям в области солнечного магнетизма.

Вторая глава посвящена всплыванию магнитных жгутов. Диссертант совершенно правильно уточняет понятие всплывания и описывает его, как появление магнитного потока на фотосфере, которое совсем необязательно может быть связано магнитной плавучестью, а

может включать в себя многие процессы, прежде всего связанные с адвекцией магнитного потока конвективными течениями. Жгут определяется как конгломерат тонких магнитных трубок, удержание которых в жгуте достигается за счет скрутки трубок вокруг оси жгута. Автор упоминает различные структуры мощностью от  $10^{18}$  до  $10^{23}$  Мх. Следует заметить, что «фибрильное» состояние магнитного поля действительно характерно для активных магнитных областей на уровне фотосферы. Как я уже упоминал ранее, нет убедительных доказательств того, что это так в глубине конвективной зоны. В тоже время, представления о фибрилльном состоянии магнитного поля внутри конвективной зоны совсем не отразились на значимости основного научного результата этой главы показывающего, что скорость нарастания магнитного потока при появлении активной области пропорциональна квадратному корню из магнитного потока. Этот фундаментальный результат пока не имеет удовлетворительного объяснения. Я считаю его одним из основных в диссертации. Рассмотренная в работе интерпретация основана на дефрагментации трубки потока при подъёме и постоянной скорости всплытия, впервые предложена в работе Otsuij и др(2011). Она не следует из фундаментальных законов МГД. Заметим, что в численных моделях эволюции скрученного магнитного жгута, например, Togiuti и др(2024) показатель роста чуть больше чем дают наблюдения, но меньше ожидаемого из эффекта простой адвекции потока. Дефрагментация жгута у поверхности конвективной зоны, полученная в этой модели не имеет ничего общего с картиной предложенной Otsuij и др(2011), а связана с адекватным учётом физики фотосферы. В модели была учтена не только конвекция, но и лучистый теплоперенос, который очень важен для формирования тонких трубок путём конвективного коллапса (см. обзор Стенфло 2013). Кроме того, Togiuti и др(2024) нашли возможное влияние скрученности жгута на скорость роста магнитного потока на поверхности. В диссертации мне не хватило обсуждения этих вопросов, тем более, что эта глава содержит очень подробный обзор теории магнитных жгутов, а глава 4 рассматривает вопросы скрученности магнитного поля.

В третьей главе исследуются особенности вращения активных и эфемерных областей по видимому диску. Многочисленные наблюдения показывают, что скорость перемещения различных структур по поверхности Солнца отличается от скорости движения плазмы на этой же широте. Эти структуры, такие как активные области, корональные точки, группы пятен, корональные дыры, волокна и др., обычно связаны с выходом магнитного поля из конвективной зоны в атмосферу, поэтому отличия в скорости вращения могут быть обусловлены отличием глубин их образования во внутренних слоях Солнца. Я считаю важным то, что результаты, представленные в диссертации, подтверждают, что активные

области в целом вращаются быстрее чем окружающая плазма. В диссертации получено важное уточнение о том, что скорость вращения активных областей по диску Солнца показывает тенденцию к уменьшению с увеличением максимального магнитного потока. Это также очень важный результат диссертации. Думаю, что дальнейший прогресс в этом направлении предполагает более тесную работу с гелиосейсмологией. Очень жаль, что в диссертации, автор не упомянул одну из ключевых работ в этом направлении, сделанную Еленой Беневоленской в 1999 году с соавторами из Стэнфорда по данным космической обсерватории SOHO/MDI. Напомню, что в этой работе авторы впервые сравнили скорость вращения магнитных полей пятен с данными гелиосейсмологии и пришли к выводу о том, что, в среднем, глобальное вращение вновь появившихся пятен соответствует локальному максимуму скорости вращения в области приповерхностного градиента угловой скорости на уровне примерно  $0.95R$ .

В четвёртой главе проводится анализ электрических токов и токовой спиральности в активных областях Солнца. В результате анализа усреднённой токовой спиральности всплывающих активных областей установлено, что к моменту окончания нарастания магнитного потока они не показывают предпочтения в знаке спиральности, которое ожидается согласно правилу полушарий. Однако правило спиральности начинает проявляться на более поздних этапах, когда активная область продолжает увеличиваться уже в атмосфере, достигая максимального размера. Замечательно то, что диссертант (вместе с соавторами публикации, среди которых — эксперт в данной области Алексей Певцов) пришел независимо к такому выводу не опираясь на теоретические интерпретации. Такой результат может свидетельствовать о том, что правило полушарий относится уже к видимой на поверхности эволюции активной области, а спиральность магнитного жгута внутри конвективной зоны не определяет правило спиральности полушарий. Результат важен для проблемы солнечного динамо, поскольку по сложившейся традиции после известных работ Зеехафера и Рэдлера, а также Певцова с соавторами было принято считать, что токовая спиральность магнитных полей активных областей является трассером  $\alpha$  эффекта, ответственного за генерацию крупномасштабного полоидального магнитного поля внутри или на поверхности Солнца. Результаты, представленные в диссертации, меняют эти уже сложившиеся представления.

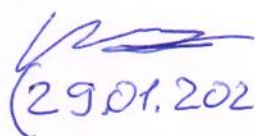
В пятой главе показано, что наблюдаемый дисбаланс магнитного потока по всему видимому диску Солнца определяется ансамблем локальных магнитных полей на поверхности, суммарная площадь которых не превышает 10% от площади диска. Это также очень важный результат. Однако осталось непонятно, насколько полученный дисбаланс компенсируется в ненаблюдаемой части диска и можно ли его рассматривать как средний по

поверхности Солнца. Интересно отметить, что Паркер в своей работе 1984 года про вынос магнитного потока из конвективной зоны также пришел к выводу о том, что 90% магнитного потока замыкается внутри Солнца.

Оценивая в диссертацию в целом, могу сказать, что проделана большая работа по получению новых данных о пространственных параметрах и эволюции локальных магнитных полей в активных и эфемерных областях Солнца вместе с уточнением роли этих структур в общем балансе магнитного потока производимого динамо в конвективной зоне. В диссертации получены новые фундаментальные результаты. Достоверность и обоснованность сделанных автором выводов не вызывает сомнений. Результаты вынесенные автором на защиту можно принять. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Считаю, что работа «Локальные магнитные поля Солнца» соответствует критериям установленным п.9 положения о порядке присуждения учёных степеней, утверждённого постановлением правительства РФ №842 от 24.09.2013, а ее автор Куценко Александр Сергеевич заслуживает присуждения степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.1 — «Физика космоса, астрономия»

Официальный оппонент,  
доктор физико-математических наук

  
(29.01.2026)

В.В. Пипин

Пипин Валерий Викторович, доктор физико-математических наук.

Диссертация защищена по специальности 01.03.03 «Гелиофизика и физика солнечной системы».

Институт солнечно-земной физики, Сибирское отделение РАН.

Ведущий научный сотрудник.

Почтовый адрес места работы: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова 126а, а/я 291, ИСЗФ СО РАН

Телефон: 8-3952-564544

e-mail: [pip@iszf.irk.ru](mailto:pip@iszf.irk.ru)

Подпись В.В. Пипина заверяю  
Ученый секретарь ИСЗФ СО РАН,  
канд. физ.-мат. наук





Салахутдинова И.И.